

島根原子力発電所第 2 号機

機器・配管系への制震装置の適用（三軸粘性ダンパ）

2022年 9 月
中国電力株式会社

1. はじめに	3
2. 基本方針	4
3. 地震応答解析手法	7
4. 入力地震動	9
5. 地震応答解析モデル	10
6. 地震応答解析結果	11
7. まとめ	12
別紙1 主蒸気系配管をS d 機能維持設計とする理由	13
別紙2 三軸粘性ダンパの配置検討	14
別紙3 三軸粘性ダンパの性能の耐震評価への反映方法策定	15
別紙4 三軸粘性ダンパの性能試験	16
別紙5 三軸粘性ダンパの許容限界	19
別紙6 三軸粘性ダンパのモデル化	20
別紙7 三軸粘性ダンパの解析モデルの追加	23
別紙8 三軸粘性ダンパの適用実績	24

設置変更許可審査時において、「機器・配管系への制震装置の適用（三軸粘性ダンパ）」に関して以下の詳細設計へ申送りした事項（詳細設計申送り事項）があったことから、詳細設計申送り事項に対する回答について説明する。

No.	詳細設計申送り事項	分類	回答	回答頁
1	<ul style="list-style-type: none"> 制震装置と対象設備の地震時の構造成立性については、設置許可段階にて示す地震応答解析手法による耐震評価結果を詳細設計段階で示す。 (第796回審査会合（2019年11月12日）における当社の回答内容) 	B	<ul style="list-style-type: none"> 三軸粘性ダンパを設置した配管について地震応答解析を行った。配管については発生応力が許容応力以下となることを確認した。三軸粘性ダンパについては荷重等の応答値が許容値以下となることを確認した。 単軸粘性ダンパ（取水槽ガントリクレーン）については、別途説明する。 	P.9~11
2	<ul style="list-style-type: none"> 三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析手法について、非対角成分が存在するモード空間での運動方程式に対して時間積分を行う方法の詳細と手法の妥当性を詳細設計段階で説明すること。 (第876回審査会合（2020年7月14日）) 	B	<ul style="list-style-type: none"> 配管系に三軸粘性ダンパを設置した場合、三軸粘性ダンパによって付与される減衰が大きく、モード座標における減衰マトリクスが対角化できないため、モード座標で連成した運動方程式により時刻歴応答解析を行う。なお、本手法は、MSC.Nastranに標準実装されている手法である。 一般的に用いられるモーダル時刻歴解析との違いは、減衰マトリクスが非対角項を持つか否かのみであり、妥当な手法であると考える。 	P.7,8

1. はじめに

- 大きな地震力が作用する機器・配管系に対して、耐震構造による補強が困難な場合、制震装置の設置により地震応答を低減することは有効な耐震補強手法のひとつである。
- 島根2号機における主蒸気系配管は、今回工認で考慮する鉛直方向の動的地震力等の影響により、耐震構造による補強が困難であることから、制震装置（三軸粘性ダンパ）を設置する。
- 三軸粘性ダンパの設置範囲及び耐震クラスを図1に示す。三軸粘性ダンパは外側主蒸気隔離弁から低圧タービン、復水器までの主蒸気系配管に設置する。また、外側主蒸気隔離弁以降の主蒸気系配管の耐震クラスはBクラスであり、外側主蒸気隔離弁から主蒸気止め弁までの範囲は弾性設計用地震動 S_d に対して破損しないことの検討を行うこととする（ S_d 機能維持）。（別紙1参照）

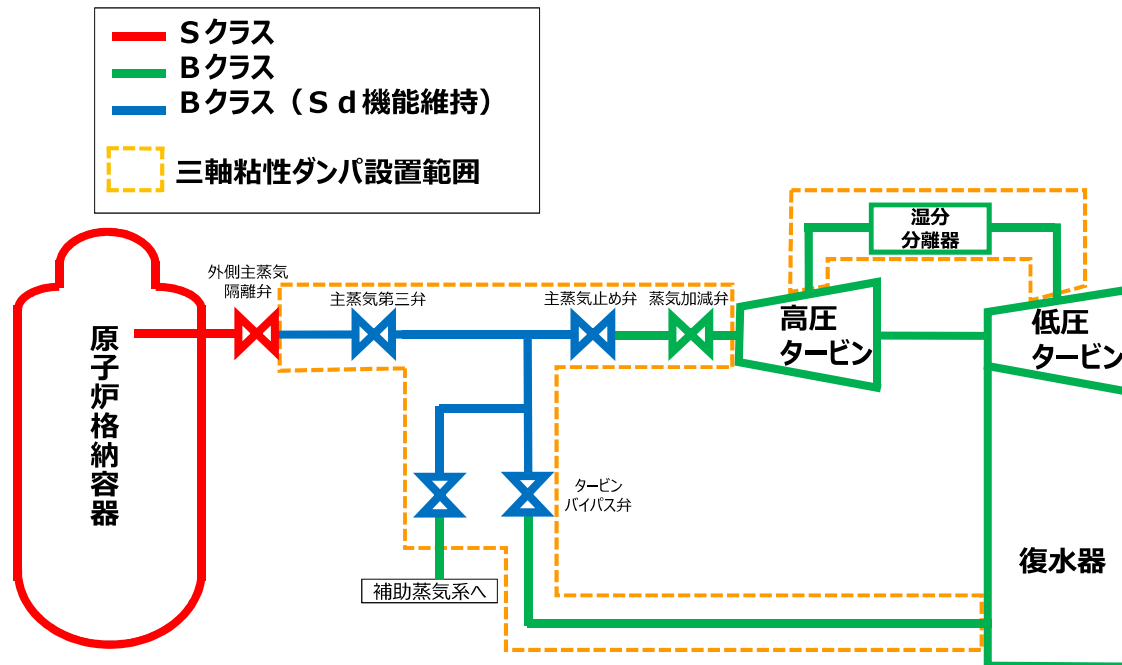


図1 三軸粘性ダンパの設置範囲及び耐震クラス

2. 基本方針 (1/3)

2.1 三軸粘性ダンパの構造

- 三軸粘性ダンパは、主にピストン、ハウジング及び粘性体から構成されており、粘性体への異物等の混入防止のために保護スリーブが取り付けられている。三軸粘性ダンパの仕様を表1に、三軸粘性ダンパの外観および構造を図2に示す。

表1 三軸粘性ダンパの仕様

型式*	外径 (mm)	高さ (mm)	質量 (kg)	許容荷重 (kN)		許容変位 (mm)	
				水平	鉛直	水平	鉛直
型式325/159	325	343	111	68	27		
型式630/426	630	586	691	350	140		

注記*：型式に使用される数値は主要寸法である「ハウジング径/ピストン径」を呼称した値である。

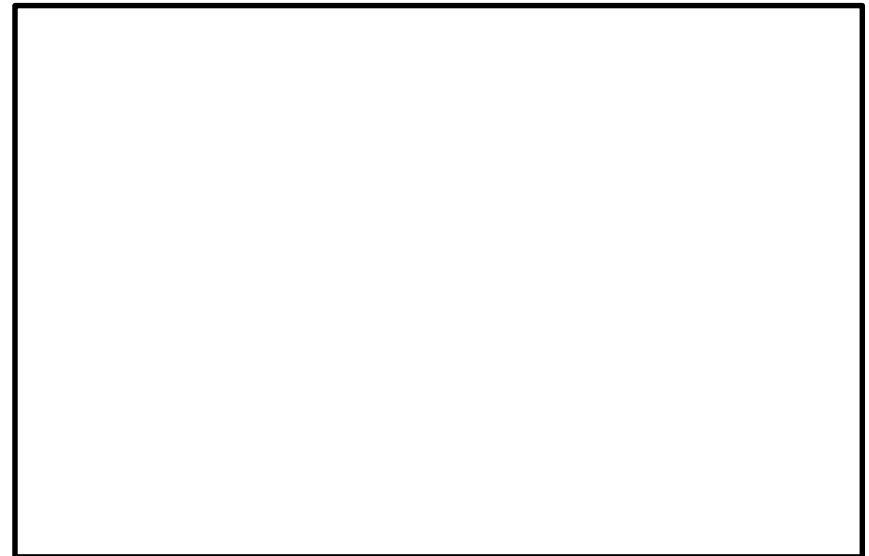
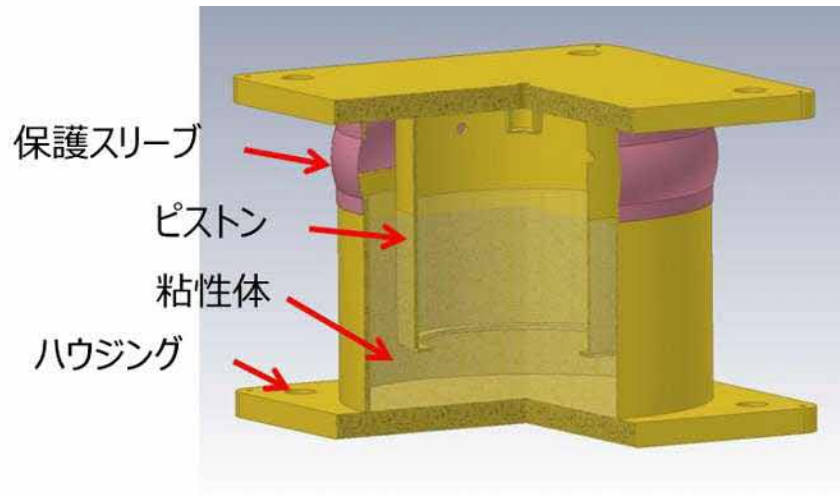


図2 三軸粘性ダンパの外観及び構造

2.2 三軸粘性ダンパの動作原理

- 三軸粘性ダンパの動作機構を図3に示す。三軸粘性ダンパは、粘性体とピストンの間に相対運動が生じることで、相対運動の方向と逆向きに流動抵抗力による減衰性能を発揮する。
- 回転対称構造であることから、水平方向については方向による減衰性能の違いはないが、鉛直方向については動作機構が異なるため、水平方向と鉛直方向では減衰性能が異なる。
- 三軸粘性ダンパは自重等の静的荷重は支持せず、熱膨張のような低速度の運動を拘束しない。

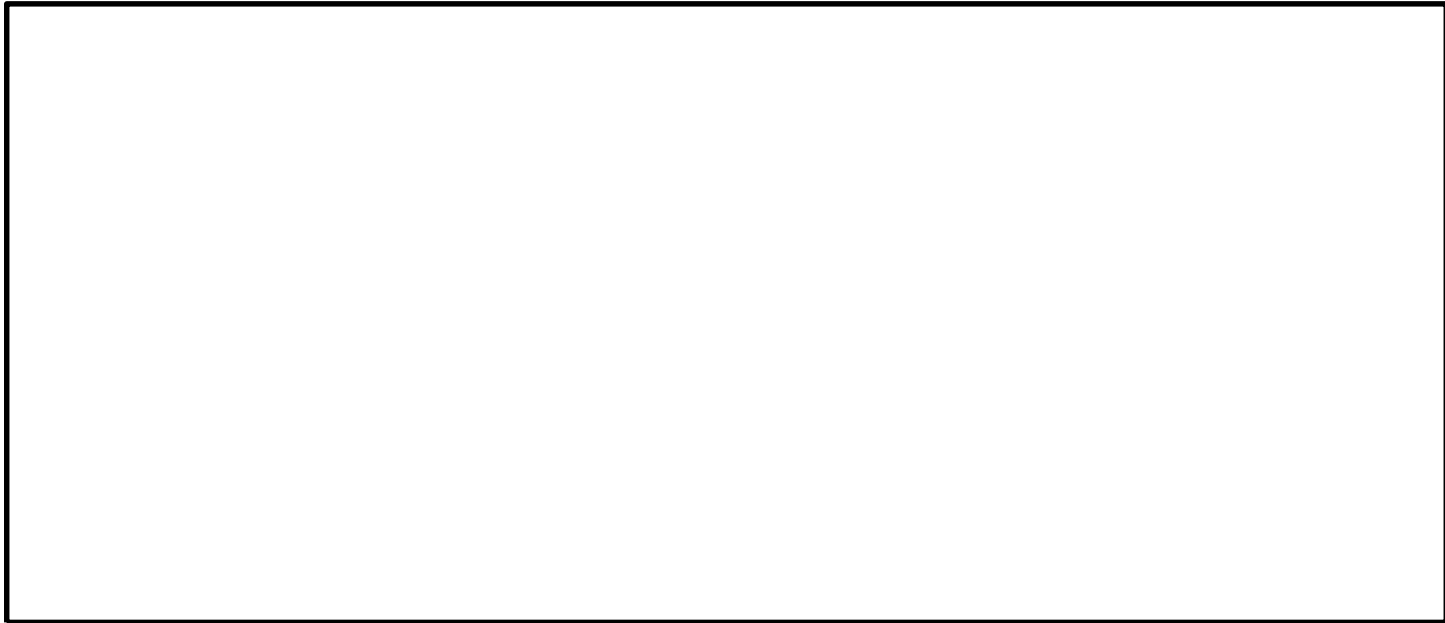


図3 三軸粘性ダンパの動作機構

2. 基本方針 (3/3)

2.3 設計方針

- 耐震設計フローを図4に示す。三軸粘性ダンパの設置に伴い追加または変更した設計プロセスについて以降で説明する。

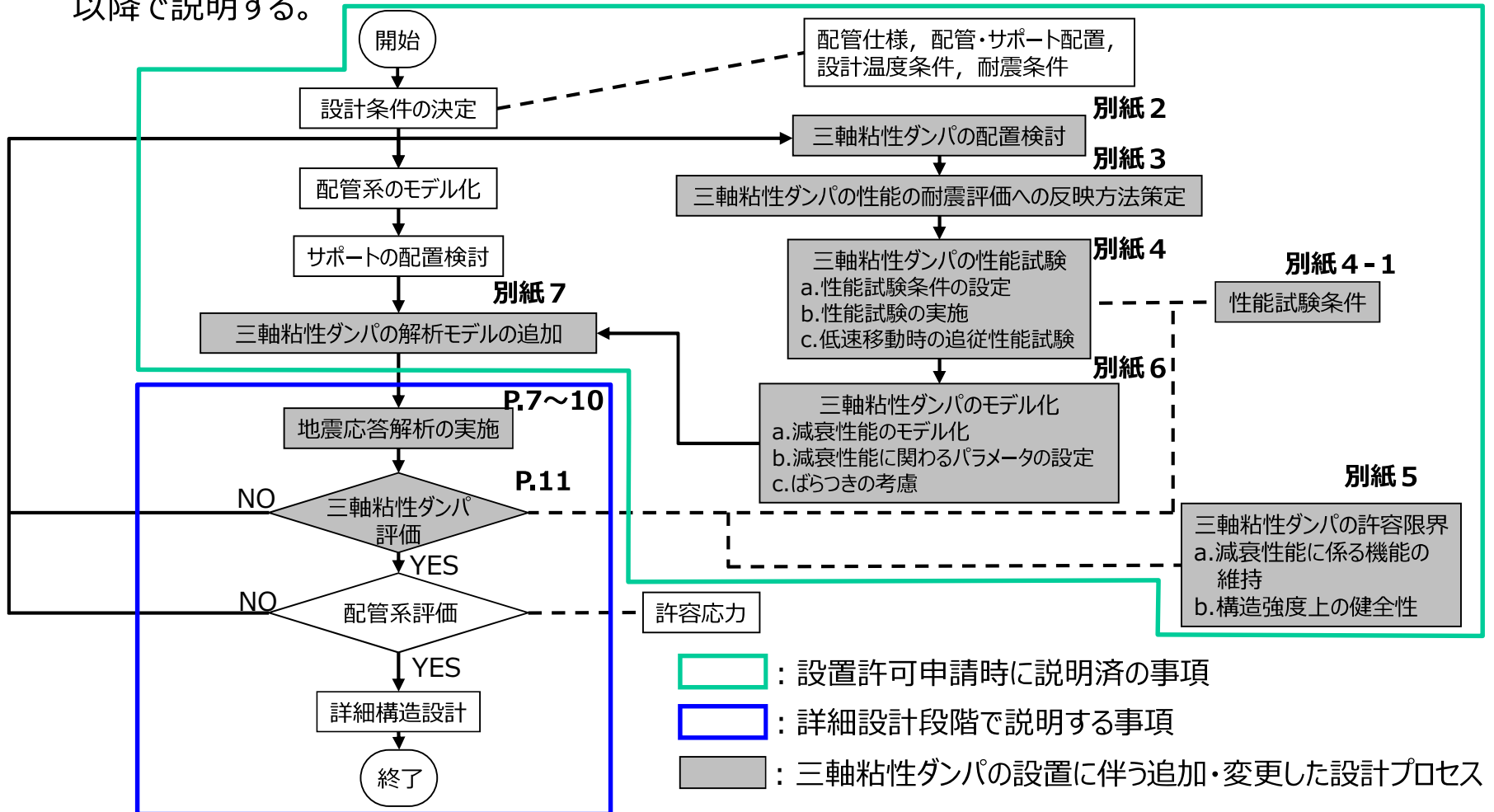


図4 三軸粘性ダンパを設置する配管系の耐震設計フロー

■ 地震応答解析手法 (空間座標)

- 三軸粘性ダンパを設置した配管系の応答は地震による慣性力を受ける配管系の運動方程式により求める。
- 三軸粘性ダンパを設置した配管系全体の減衰マトリクス $[C]$ は、各モードに一律付与する配管系の設計用減衰定数に対応した減衰マトリクス $[C_p]$ 及び三軸粘性ダンパによって配管系に付与される減衰に対応した減衰マトリクス $[C_D]$ の和として設定する。

【空間座標における運動方程式】

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{I\}\ddot{y}$$

$[M]$, $[K]$: 配管系の質量, 剛性マトリクス

$\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$: 空間座標における配管系の加速度, 速度, 変位ベクトル

$\{I\}$: 単位ベクトル

\ddot{y} : 入力加速度

$[C]$: 三軸粘性ダンパを設置した配管系全体の減衰マトリクス

但し, $[C] = [C_p] + [C_D]$

$[C_p]$: 各モードに一律付与する配管系の設計用減衰定数に対応した減衰マトリクス

$[C_D]$: 三軸粘性ダンパによって配管系に付与される減衰に対応した減衰マトリクス

■ 地震応答解析手法 (モード座標)

- $[C_p]$ は減衰が小さいためモード座標で対角化することができる(近似)。一方, $[C_D]$ は三軸粘性ダンパによって付与される減衰が大きいため, 対角化できない。そのため, 配管系に三軸粘性ダンパを設置した場合, モード座標で連成した運動方程式により時刻歴応答解析を行う。
- 一般的に用いられるモーダル時刻歴解析との違いは, 減衰マトリクスが非対角項を持つか否かのみであり, 妥当な手法であると考えられる。解析には, 本手法が標準実装されているMSC.Nastranを用いる。

【モード座標における運動方程式】

$$[\Lambda]^T [M] [\Lambda] \{\ddot{q}\} + [\Lambda]^T [C] [\Lambda] \{\dot{q}\} + [\Lambda]^T [K] [\Lambda] \{q\} = -[\Lambda]^T [M] \{I\} \ddot{y}$$

$[\Lambda]$: モードマトリクス
 $\{\ddot{q}\}, \{\dot{q}\}, \{q\}$: モード座標における配管系の加速度, 速度, 変位ベクトル

モード座標における三軸粘性ダンパを設置した配管系全体の減衰マトリクス

$$[\Lambda]^T [C] [\Lambda] = \underline{\underline{[\Lambda]^T [C_D] [\Lambda]}} + \underline{\underline{[\Lambda]^T [C_p] [\Lambda]}}$$

モード座標における三軸粘性ダンパによって配管系に付与される減衰に対応した減衰マトリクス

モード座標における各モードに一律付与する配管系の設計用減衰定数に対応した減衰マトリクス

三軸粘性ダンパによって付与される減衰が大きいため, 対角化できない。(三軸粘性ダンパのモデル化については別紙6及び7を参照)

一般的な配管系と同様の減衰マトリクスであり, 右式のように近似することができる。

$$\frac{[\Lambda]^T [C_p] [\Lambda]}{[\Lambda]^T [M] [\Lambda]} \cong \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & 2\zeta_i \omega_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix}$$

ζ_i : i次のモード減衰比
 ω_i : i次の固有角振動数

4. 入力地震動

- Bクラス（S d 機能維持）の主蒸気系配管の地震応答解析に用いる入力地震動は、弾性設計用地震動 S d - 1, S d - D, S d - F 1, S d - F 2, S d - N 1, S d - N 2とする。
- Bクラス（S d 機能維持）の主蒸気系配管は、原子炉建物、タービン建物及び蒸気タービンの基礎に設置する配管であり、地震応答解析は加速度時刻歴波を用いて3方向同時入力により行う。
- 地震応答解析に用いる加速度時刻歴波の例：S d - 1を表2に示す。

表2 加速度時刻歴波の例：S d - 1

	原子炉建物 <input type="text"/>	タービン建物 <input type="text"/>	蒸気タービンの基礎 <input type="text"/>
N S			
E W			
U D			

5. 地震応答解析モデル

- Bクラス（S d機能維持）の主蒸気系配管の地震応答解析モデルを図5に示す。
- Bクラス（S d機能維持）の主蒸気系配管には37個の三軸粘性ダンパを設置する。

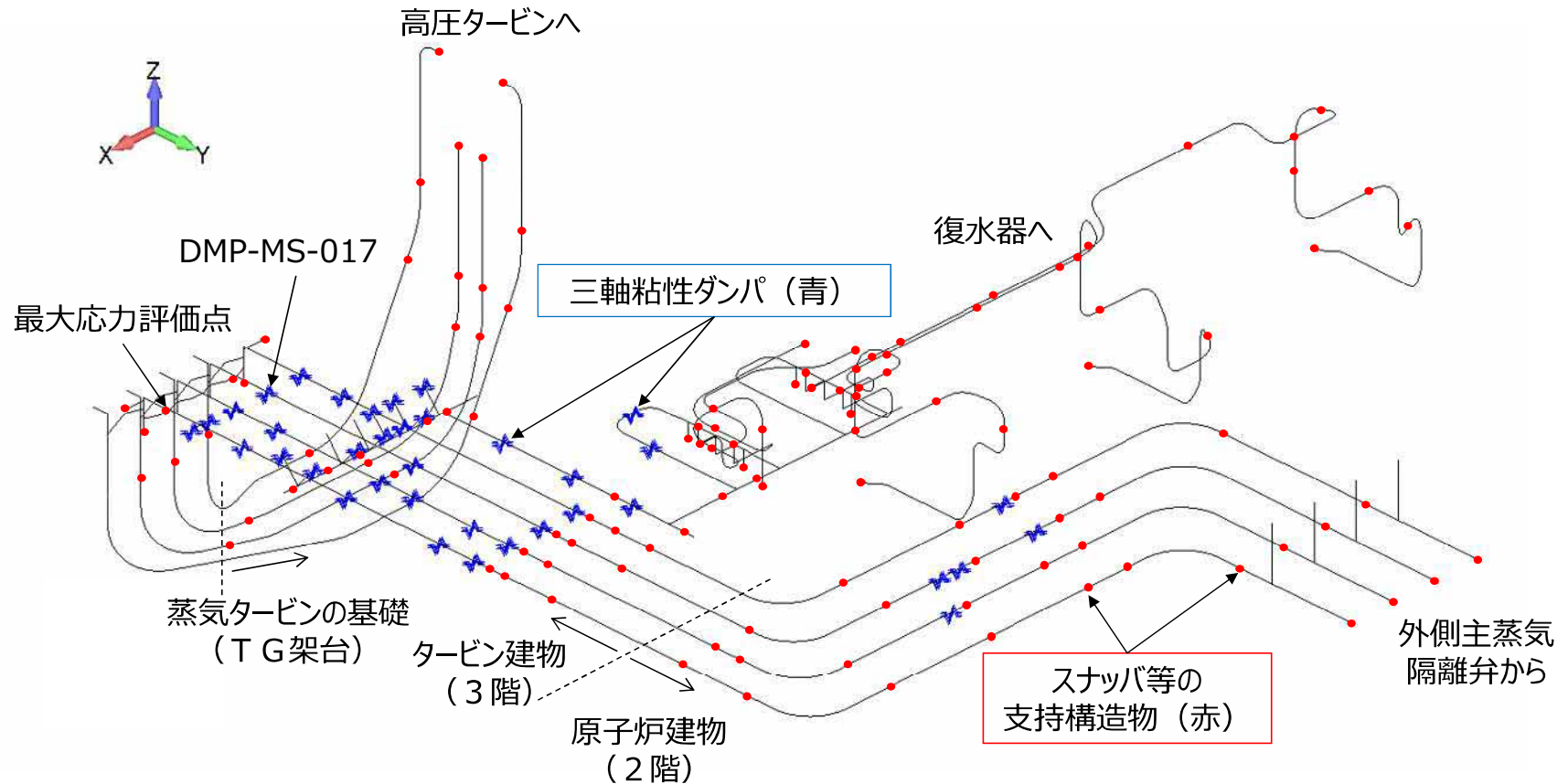


図5 Bクラス（S d機能維持）の主蒸気系配管の地震応答解析モデル

6. 地震応答解析結果

➤ 三軸粘性ダンパを設置したBクラス（S d 機能維持）の主蒸気系配管の地震応答解析結果を以下に示す。

- 配管：発生応力が許容応力以下となることを確認した。
- 三軸粘性ダンパ
 - 構造強度評価：発生荷重が許容荷重以下となることを確認した。
 - 機能維持評価：変位振幅及び累積消費エネルギーが許容値以下となることを確認した。
(許容値は、性能試験条件に基づき設定。別紙4-1参照)

表3 Bクラス（S d 機能維持）の主蒸気系配管の応力評価結果*

許容応力 状態	最大応力区分 (許容応力)	鳥瞰図 番号	最大応力 評価点	応力評価		疲労評価
				計算応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	疲労累積 係数
IV A S	一次応力 ($0.9 \cdot S_u$)	MS-T-1	264	108	377	—
	一次+二次応力 ($2 \cdot S_y$)	MS-T-1	264	120	396	—

表4 Bクラス（S d 機能維持）の主蒸気系配管に取付く三軸粘性ダンパの耐震評価結果*

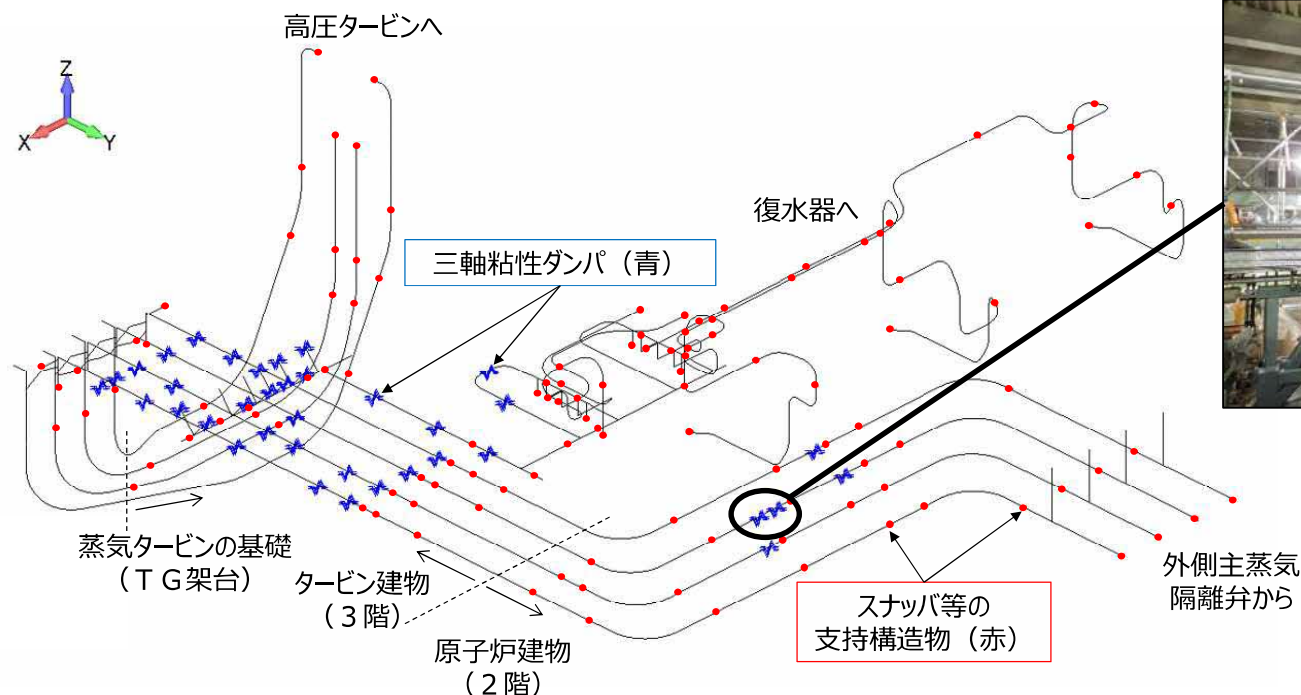
許容応力 状態	支持構造物 番号	型式	方向	構造強度評価		機能維持評価			
				荷重評価		変位振幅評価		累積消費エネルギー 評価	
				計算値 (kN)	許容値 (kN)	計算値 (mm)	許容値 (mm)	計算値 (kJ)	許容値 (kJ)
IV A S	DMP-MS-017	型式630/426	水平	191	350	4.3		18.5	
			鉛直	64	140	2.8		6.7	

注記*：評価上最も厳しい結果となるS d - 1についての評価結果を示す

- 三軸粘性ダンパを設置した配管について、弾性設計用地震動の6波を入力地震動とし、地震応答解析を行った結果、配管については発生応力が許容応力以下となることを確認した。また、三軸粘性ダンパについては荷重等の応答値が許容値以下となることを確認した。
- 配管系に三軸粘性ダンパを設置した場合、三軸粘性ダンパによって付与される減衰が大きく、モード座標で運動方程式中の減衰マトリクスが対角化できないため、モード座標で連成した運動方程式により時刻歴応答解析を行った。本手法と一般的に用いられるモーダル時刻歴解析との違いは、減衰マトリクスが非対角項を持つか否かのみであり、妥当な手法であると考える。

- J E A G 4 6 0 1・補-1984 における耐震クラスと被ばく線量に関する記載を示す。主蒸気管（原子炉格納容器外側主蒸気隔離弁より主蒸気止め弁までの範囲及び主蒸気ヘッドから分岐しタービンバイパス弁並びに補助蒸気系との境界弁までの範囲の管）については、仮に破断した場合に、一次冷却系から直接外部へ放射性気体（核分裂生成物）を放出する事象が引き起こされる可能性があることに配慮して、弾性設計用地震動 S d に対して破損しないことの検討を行うこととした。

- 配管系の地震荷重の低減に効果的な三軸粘性ダンパの配置を検討する。
- 三軸粘性ダンパは粘性体とピストンの間に相対運動が生じることで減衰性能を発揮するため、配管系の変位が大きくなり、設置が可能な箇所に設置する。



三軸粘性ダンパの設置例

主蒸気系配管における三軸粘性ダンパの配置イメージ

(別紙3) 三軸粘性ダンパの性能の耐震評価への反映方法 策定

②三軸粘性ダンパの減衰性能への影響の検討

- 三軸粘性ダンパの性能試験及びモデル化にあたって、減衰性能への影響の検討を要する項目を「免震構造の審査手引きの提案（平成26年1月）独立行政法人原子力安全基盤機構」を参照して抽出した。
- 減衰性能に影響する項目は、減衰性能を取得するための性能試験条件の設定もしくは地震応答解析においてばらつきとして考慮する。

減衰性能への影響の検討結果（三軸粘性ダンパ）

No.	項目	減衰性能への影響	対応方針
1	水平・鉛直同時加振	地震時に三軸粘性ダンパは3方向同時加振されることから、水平方向及び鉛直方向の同時加振と1方向加振との減衰性能に差異がないことを試験により確認している。	—
2	放射線	放射線による減衰性能への影響が十分小さいことを試験により確認している。	—
3	温度	粘性体は高温になるほど粘度が低下する性質があることから、粘性体の温度によって三軸粘性ダンパの減衰性能が変動することを試験により確認している。	設置環境及び応答解析結果が減衰性能を取得する性能試験条件の範囲内であることを確認する。
4	振幅	減衰性能は加振振幅が大きいほど低下することを試験により確認している。	
5	連続加振	減衰性能は連続加振により累積消費エネルギーが増大すると低下することを試験により確認している。	
6	製造公差	製造公差による減衰性能のばらつきは±10%以内で管理する。	左記のばらつき要因を合わせて±30%の減衰性能のばらつきを考慮する。
7	据付公差	据付公差による減衰性能のばらつきは±20%以内で管理する。	

(a. 性能試験条件の設定)

- 三軸粘性ダンパの実機使用条件を踏まえ、性能試験条件を設定する。
- 三軸粘性ダンパの減衰性能は、変動及びばらつきを包絡するように上限と下限を設定する。上限及び下限を設定する理由は、減衰性能が低いほど配管系の応答は大きくなる傾向であるが、三軸粘性ダンパを支持する構造物の設計においては上限の減衰性能に基づく最大荷重を適用するためである。
- 温度、振幅及び連続加振による変動を踏まえた性能試験条件により、高側ダンパ試験性能 (K_{High} , C_{High}) と、低側ダンパ試験性能 (K_{Low} , C_{Low}) を性能試験で取得する (別紙 4-2)。
- 三軸粘性ダンパは水平方向と鉛直方向では減衰性能が異なるため、各方向で性能試験を実施する。

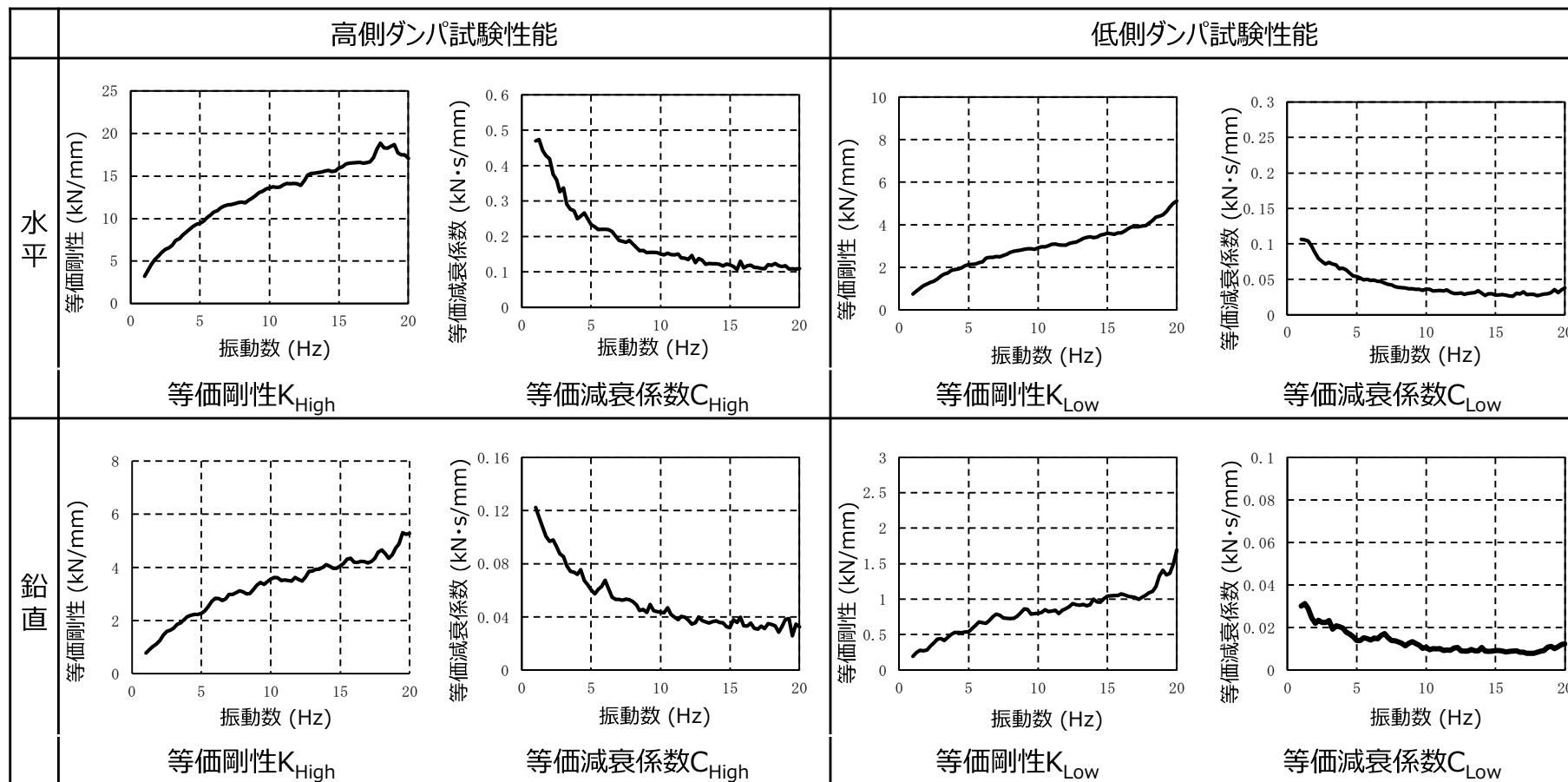
三軸粘性ダンパの性能試験条件の設定

取得性能	試験条件設定の考え方	性能試験条件		
		温度	加振 振幅	累積消費 エネルギー
高側ダンパ試験性能 (K_{High} , C_{High})	実機使用条件より減衰性能を高く取得するため、室温、微小加振振幅、微小累積消費エネルギーとする。	常温	小	小
低側ダンパ試験性能 (K_{Low} , C_{Low})	実機使用条件より減衰性能を低く取得するため、実機使用で想定される最高温度、最大加振振幅、最大累積消費エネルギーとする。	高温※1	大※1	大※1

※1：実機使用条件を想定して設定する

(別紙4-2) 三軸粘性ダンパの性能試験 (b. 性能試験の実施)

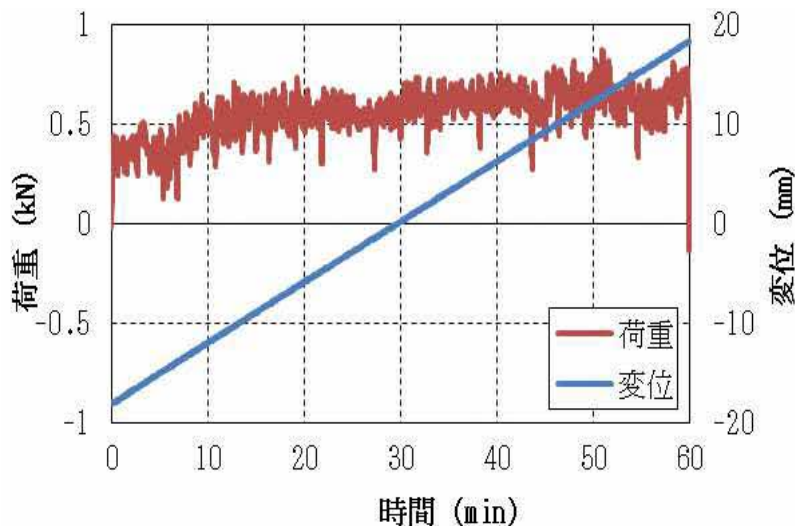
- 設定した性能試験条件により、実機に設置する各型式の三軸粘性ダンパについて、水平方向及び鉛直方向でそれぞれ高側及び低側ダンパ試験性能を取得した。



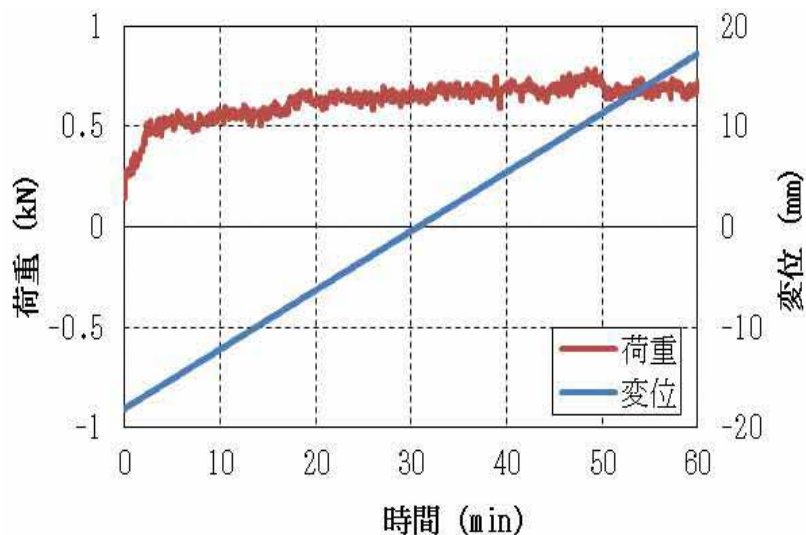
高側及び低側ダンパ性能試験結果 (型式325/159の例)

(別紙4-3) 三軸粘性ダンパの性能試験 (c. 低速移動時の追従性能確認試験)

- 三軸粘性ダンパは熱膨張のような低速度の運動を拘束しないものであるが、低速移動時の拘束力（抵抗力）を定量的に確認するため、低速移動試験を実施した。
- 低速移動試験の速度は、島根2号機で適用する型式のうち最大の許容変位（72mm）が、熱膨張が大きい主蒸気系配管における通常運転温度までの昇温時間（約4.5時間）で生じることを想定した場合の速度0.005mm/sに余裕を見て、0.01mm/sとした。
- 熱膨張を想定した低速移動に対して三軸粘性ダンパの発生荷重は、三軸粘性ダンパの許容荷重（水平：350kN、鉛直140kN）に対し、1kNを下回る十分に小さな値となった。



水平方向



鉛直方向 (ピストンを上げる方向)

高側及び低側ダンパ性能試験結果 (型式325/159の例)

(別紙5) 三軸粘性ダンパの許容限界

- 三軸粘性ダンパを設置した配管系の応答値が、三軸粘性ダンパの減衰性能を取得した性能試験の試験条件の範囲内であることを確認する。
- 三軸粘性ダンパを設置した配管系の地震応答解析によって得られた支持点荷重が、三軸粘性ダンパを構成する部材の許容限界に基づき、あらかじめ設定した許容荷重以下となることを確認する。

三軸粘性ダンパ評価方法及び許容限界

評価する項目	評価方法	確認指標	許容限界
減衰性能に係る機能の維持	地震応答解析で得られる応答値が、減衰性能を確認した性能試験の試験条件の範囲内となることを確認する	変位振幅*1 累積消費エネルギー*2	性能試験に用いた加振振幅及び累積消費エネルギー
構造強度上の健全性	地震応答解析で得られる支持点荷重が、使用荷重以下となることを確認する	支持点荷重	使用荷重*3

注記*1：三軸粘性ダンパのピストンとハウジングの相対変位量（片振幅）

*2：三軸粘性ダンパで消費されるエネルギーの総和であり、下式から算出される。

$$W = \int_0^T F(t) \frac{dx(t)}{dt} dt$$

$F(t)$ ：三軸粘性ダンパ反力
 $x(t)$ ：三軸粘性ダンパ変位
 T ：加振継続時間

*3：三軸粘性ダンパを構成する部材に生じる発生応力が J E A G 4 6 0 1 に規定される許容限界を一定の裕度をもって満足するようにあらかじめ設定した許容荷重

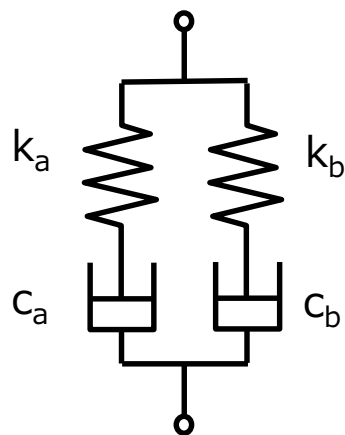
(別紙 6-1) 三軸粘性ダンパのモデル化

(a. 減衰性能のモデル化)

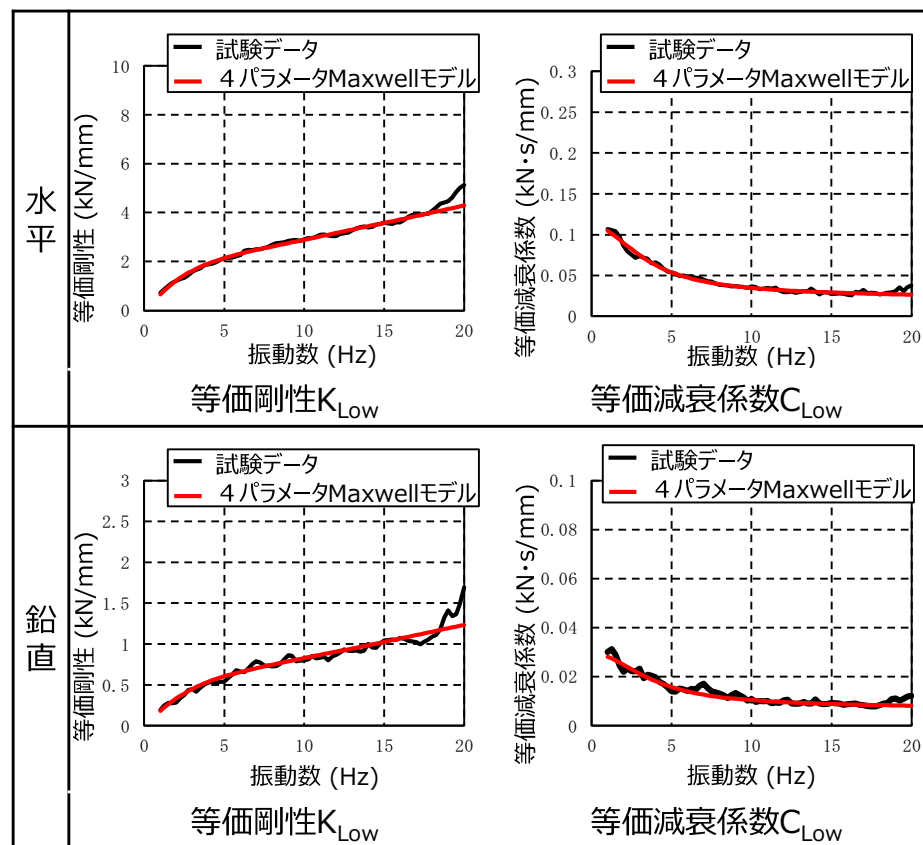
(b. 減衰性能に関わるパラメータの設定)

- 性能試験の結果に基づき、三軸粘性ダンパの減衰性能を振動数依存性を精度良くモデル化できる4パラメータMaxwellモデルでモデル化する。
- 三軸粘性ダンパの減衰性能は、水平方向及び鉛直方向でそれぞれ高側及び低側ダンパ試験性能を取得するため、4パラメータMaxwellモデルも同様に各方向に対して高側及び低側を設定する。

k_a, k_b :ばね剛性
 c_a, c_b :ダッシュポットの減衰係数



三軸粘性ダンパの
4パラメータMaxwellモデル

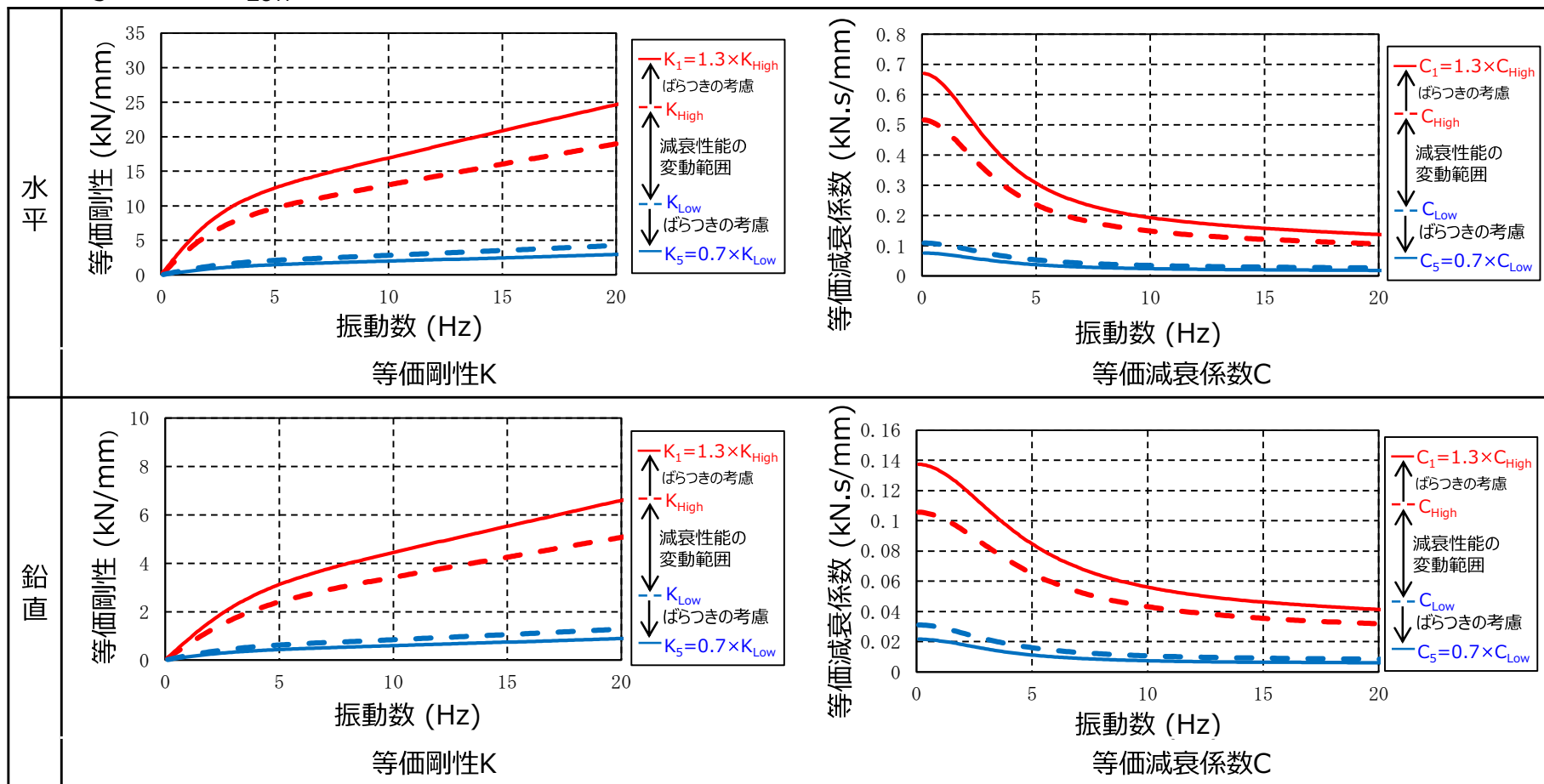


ダンパ性能試験のモデル化 (型式 3 2 5 / 1 5 9・低側の例)

(別紙6-2) 三軸粘性ダンパのモデル化 (c. ばらつきの考慮)

① 上限及び下限の減衰性能のモデル化

- 高側及び低側の減衰性能に、さらに±30%のばらつき（製造公差：±10%、据付公差：±20%）を考慮し、解析上の減衰性能の上限（ $K_1=1.3 \times K_{High}$, $C_1=1.3 \times C_{High}$ ）及び下限（ $K_5=0.7 \times K_{Low}$, $C_5=0.7 \times C_{Low}$ ）を設定する。

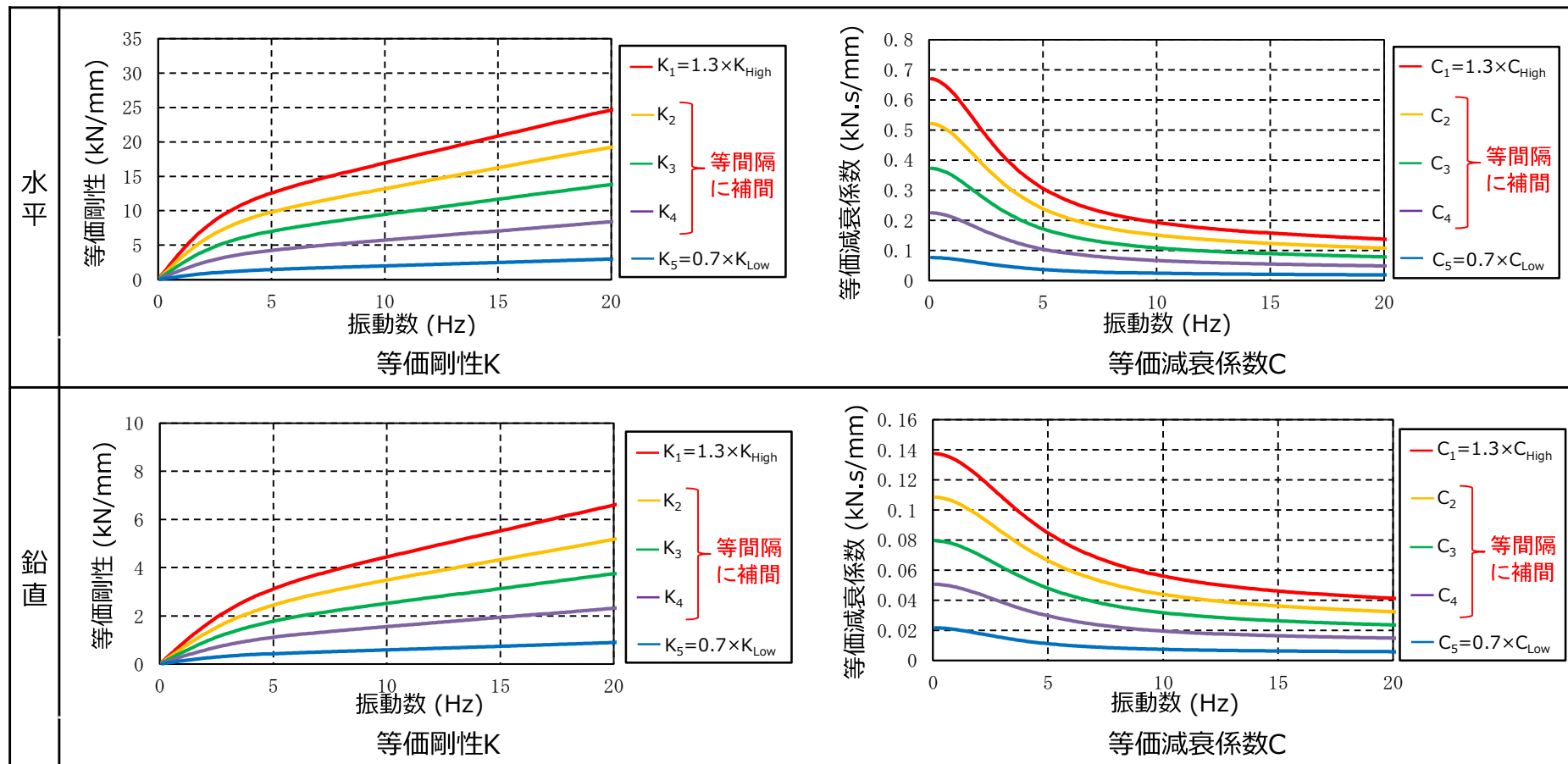


性能試験による減衰性能の上限と下限の設定（型式3 2 5 / 1 5 9 の例）

(別紙6-3) 三軸粘性ダンパのモデル化 (c. ばらつきの考慮)

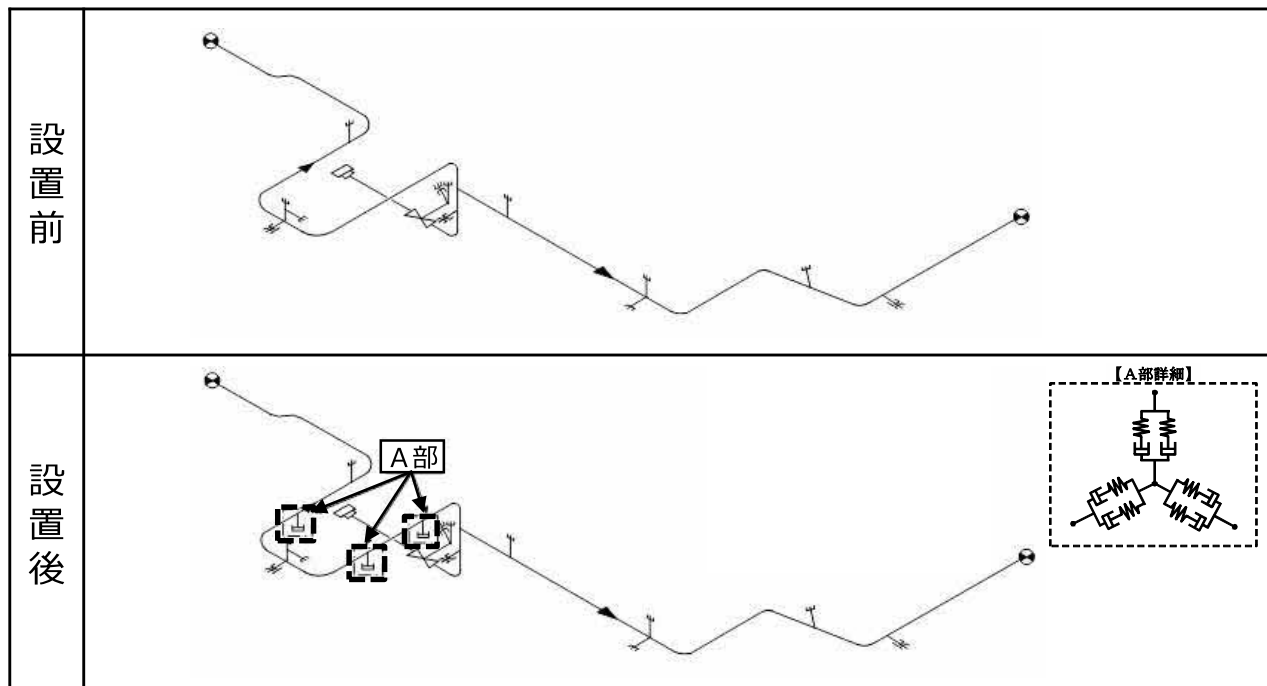
②段階的な減衰性能の設定

- 三軸粘性ダンパの減衰性能は、性能試験結果及び製造公差等のばらつきを考慮することに伴い、上限と下限の減衰性能の差が大きくなるため、5段階の等間隔に補間した減衰性能を設定する。



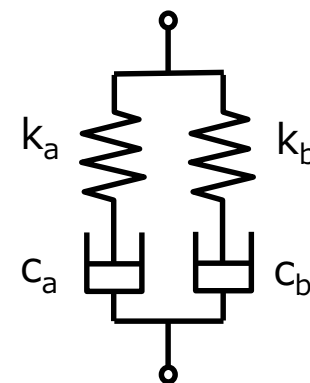
地震応答解析モデルにおける段階的な減衰性能の設定 (型式3 2 5 / 1 5 9の例)

- 配管系は3次元はりモデルによりモデル化する。
- 三軸粘性ダンパを4パラメータMaxwellモデルでモデル化し、その設置位置に追加する。
- 三軸粘性ダンパ設置前の地震応答解析モデルに制震装置を適切にモデル化して追加するという考え方は、既工認実績のある排気筒のモデル化の考え方と同様であり、4パラメータMaxwellモデルによるモデル化は海外の原子力発電所において実績のある手法である。



配管系の地震応答解析モデルの比較

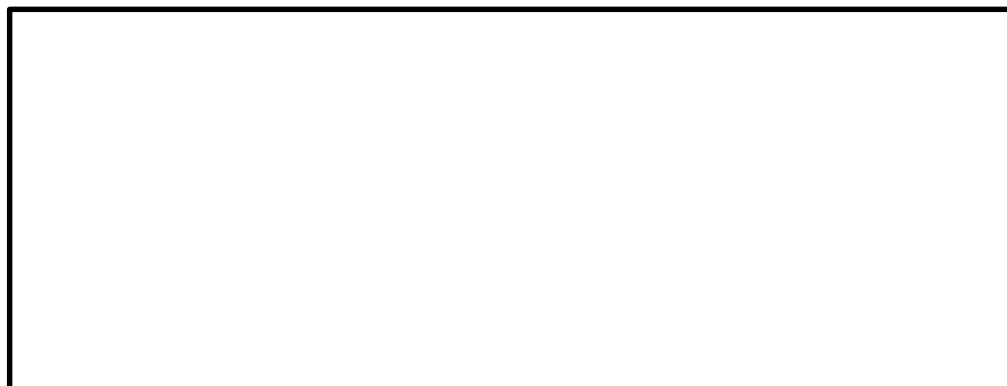
k_a, k_b :ばね剛性
 C_a, C_b :ダッシュポットの減衰係数



三軸粘性ダンパの
4パラメータMaxwellモデル

(別紙 8) 三軸粘性ダンパの適用実績

- 三軸粘性ダンパは、原子力発電所に用いることができる制震装置としてASME Boiler and Pressure Vessel Code に記載されており、海外の原子力発電所において振動対策及び地震対策として設置実績がある。
- 国内において、原子力分野以外で、石油プラントの配管系、コンサートホール等の大規模建物の制振システム及び振動台の機械装置の防振対策等への設置実績がある。



海外原子力発電所における三軸粘性ダンパの設置例



国内における三軸粘性ダンパの設置例